



DEUTSCHES  
PATENTAMT

21 Aktenzeichen: P 32 01 056.7-35  
22 Anmeldetag: 15. 1. 82  
43 Offenlegungstag: —  
45 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 11. 8. 83

DE 3201056 C 1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

73 Patentinhaber:

Fried. Krupp GmbH, 4300 Essen, DE

72 Erfinder:

Becker, Hans-Joachim, Dipl.-Ing.; Bensmann,  
Günter, Dr.-Ing., 4300 Essen, DE; Baumgart, Frank  
Walter, Prof. Dr.-Ing., 4030 Ratingen, DE

56 Im Prüfungsverfahren entgegengehaltene  
Druckschriften nach § 44 PatG:

DE-PS	22 60 839
DE-AS	12 48 228
DE-OS	28 21 785
DE-OS	27 03 529
DE-OS	25 58 584
US	37 86 806

Behördeneigentum

54 Marknagel

Die Erfindung betrifft einen Marknagel, der vorwiegend in lange Röhrenknochen längs der Markhöhle eingeführt und zur Fixierung von Frakturstellen verwendet wird, bestehend aus einem im wesentlichen geschlossenen, teils auch gewickelten, rohrförmigen Hohlkörper, der aus einer Ni-Ti-Legierung besteht und entsprechend seiner plastischen Vorverformung nach dem bereits bekannten Memory-Effekt einen von zwei möglichen Formzuständen aufweist, die sich insbesondere durch verschiedene Radien ( $r_1$  bzw.  $r$ ) des jeweils kleinsten, den Querschnitt des Marknagels umhüllenden Kreises (10 bzw. 10') unterscheiden und daß der Marknagel einen vieleckigen, mindestens aber viereckigen, mäander- oder kissenförmigen Querschnitt mit konkav oder eben geformten Außenwänden (1) besitzt, der nach Über- bzw. Unterschreiten der den Memory-Effekt auslösenden Temperatur in einen kreisförmigen oder einen vieleckigen Querschnitt mit konkaven Außenwänden geringerer Krümmung ( $\rho_0$ ) aufweitbar ist.

(32 01 056)

FIG. 1a

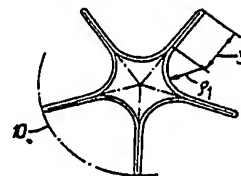
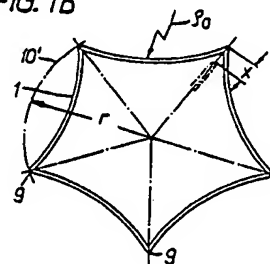


FIG. 1b



## Patentansprüche:

1. Marknagel, der in lange Röhrenknochen längs der Markhöhle eingeführt und zur Fixierung von Frakturstellen verwendet wird, bestehend aus einem rohrförmigen Hohlkörper aus einer Ni-Ti-Legierung, die aufgrund von Gefügeumwandlungen ihre Form bei Wärmezufuhr bleibend verändert, wobei der Marknagel entsprechend seiner plastischen Vorverformung unter Ausnutzung des Memoryeffektes in Abhängigkeit von der Temperatur jeweils einen von zwei möglichen Formzuständen aufweist, dadurch gekennzeichnet, daß sich die Formzustände durch verschiedene Radien ( $r_1, r$ ) des jeweils kleinsten, den Querschnitt des Marknagels umhüllenden Kreises (10, 10') unterscheiden und daß der Marknagel einen vieleckigen, mindestens aber viereckigen, stern-, mäander- oder kissenförmigen Querschnitt mit konkav oder eben geformten Außenwänden (1) besitzt, der nach Über- bzw. Unterschreiten der den Memoryeffekt auslösenden Temperatur in einen kreisförmigen Querschnitt oder einen vieleckigen Querschnitt mit konkaven Außenwänden geringerer Krümmung ( $q_0$ ) aufweitbar ist.

2. Marknagel nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch einen doppelwandigen Aufbau.

3. Marknagel nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß in den durch die Marknagelwand gebildeten inneren Hohlraum oder zwischen die Doppelwände des Marknagels ein Formteil (14) eingeschoben ist.

4. Marknagel nach Anspruch 3, gekennzeichnet durch geschlossene Hohlräume, die über einen Anschluß mit gasförmigen und/oder flüssigen Körpern gefüllt oder durchströmt werden können.

5. Marknagel nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Marknagelspitze (6, 7) eine axiale, verschließbare Öffnung zur Aufnahme eines Führungskörpers (4) für den Nagel aufweist.

6. Marknagel nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß der Führungskörper (4) ein Spieß ist, der auf seiner Spitze einen aufgesteckten Kunststoffkonus (5, 8) trägt, mit dem beim Herausziehen des Führungskörpers (4) die Öffnung im Marknagel verschließbar ist.

7. Marknagel nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die im Querschnitt konkaven Außenwände ein feines, unregelmäßiges Wellenprofil besitzen, das durch auf die Außenwände aufgebrachte Blech- oder Drahttrundteile (3) gebildet wird.

8. Marknagel nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Marknagelkanten (2) materialverstärkt sind.

Die Erfindung betrifft einen Marknagel gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1. Als Werkstoff für Marknägel verwendet man in den meisten Fällen rostfreien Stahl.

Nach dem Stand der Technik bekannte Marknägel weisen in der Regel einen offenen Querschnitt mit einer Form auf, die an ein dreiblättriges Kleeblatt erinnert und womit bezweckt werden soll, daß die gegenüber der Knochenbohrung etwa im Durchmesser 0,5 bis 1 mm größeren Marknägel gegen Rotation gesichert und

dennoch infolge der sich aus der gewählten Form ergebenden Querschnittselastizität im großen und ganzen leicht in den Knochen eingebracht werden können. Dennoch sind die beim Einschlagen des Marknagels aufzubringenden Kräfte sehr groß, was in Einzelfällen sogar zum Sprengen des Knochens führen kann. Darüber hinaus besteht bei den beschriebenen Marknägeln die Gefahr, daß Knochengewebe in den offenen Längsspalt des Nagels einwächst, was das Entfernen des Nagels nach durchlaufenem Heilungsprozeß behindern kann. Schließlich besteht bei diesen Marknägeln keine Möglichkeit der Längsverankerung, so daß sie nach dem Einbringen in den Knochen mitunter nicht nur proximal, sondern auch distal »wandern«.

Es sind daher schon viele Versuche unternommen worden, einen Marknagel zu schaffen, der auch eine Längsverankerung nach dessen Einbringen in den Knochen ermöglicht.

So ist erstmals aus der DE-AS 12 48 228 eine Vorrichtung bekanntgeworden, die mit einem in der Markhöhle der Länge nach einzuführenden hohlen Marknagel und einem denselben der Länge nach durchsetzenden, beiderseits der Bruchstelle gehaltenen Axialspanner arbeitet. Zusätzlich ist zur Verankerung eine den Hohlraum durchsetzende Schraube, die in einem weiteren operativen Vorgang eingebracht werden muß, erforderlich.

Ähnliche Spreizkörper sind auch in der DE-PS 22 60 839 beschrieben. Die dort geschilderten Spreizvorrichtungen besitzen jedoch den Nachteil, daß deren Entfernung durch eingewachsene Knochenteile behindert oder sogar verhindert werden kann.

Es ist auch schon ein auf seiner gesamten wirksamen Länge spreizbarer Marknagel vorgeschlagen worden, der lamellenartig geformte, dünnwandige, überlappende Bleche aufweist, die entweder mechanisch oder mittels Gas oder einer Flüssigkeit aufgeweitet werden können (siehe DE-OS 25 58 584). Die für die Aufweitung wirkende Aufspaltung der Nagelwand in Längslamellen führt allerdings zu einer erheblichen Verminderung der Torsionssteifigkeit des Nagels, so daß die relative Drehung der Frakturteile um die Nagelachse nicht sicher verhindert werden kann. Außerdem dürfte die Aufrechterhaltung des Innendrucks Schwierigkeiten bereiten, so daß die Kompression der Frakturfläche zu gering ist, da sie lediglich durch Querkontraktionswirkung des Nagels hervorgerufen wird.

Schließlich wird in der DE-OS 28 21 785 ein Kompressionsnagel beschrieben, bei dem die Verankerung mit einem distalen, ausfahrbaren Krallenteil, das in einem proximalen Krallenteil axial verschiebbar gelagert ist, erfolgt. Jedoch ist mit diesen Kompressionsnägeln auch keine kraftschlüssige Verbindung zwischen Nagel und Knochenwand möglich.

Insgesamt weisen die vorstehend beschriebenen Marknägel vor allem die Nachteile auf, daß deren Ein- und Ausbringen große Kräfte erfordert, womit die Gefahr einer Knochenschädigung gegeben ist, daß entweder keine oder nur eine unzureichende Verankerung des Marknagels in Längsrichtung des Knochens möglich ist, daß vielfach ein starkes Aufbohren des Knochens nötig ist und damit die Gefahr einer Fettembolie gegeben ist und daß die Anpreßdrücke meist sehr hoch gewählt werden müssen und nach Einbringen des Nagels unkontrollierbar sind, wobei dennoch eine Relativrotation der Frakturteile nicht sicher verhindert werden kann. Teilweise besitzen die

bisher bekannten Marknägel auch zu geringe Festigkeit, Steifigkeit gegen Biegung und/oder Torsionssteifigkeit. Dazu kommt, daß die Handhabung der Marknägel zum Teil kompliziert und umständlich ist.

Darüber hinaus ist bekannt, daß als sogenannte »Memory-Legierungen« bezeichnete Ni-Ti-Legierungen aus 55% Ni, Rest Ti nach entsprechender Vorverformung durch Wärmezufuhr mechanische Arbeit verrichten können. Dieser auf Gefügeumwandlung beruhende Effekt, der sich als eine spannungsinduzierte, martensitische Umwandlung, die reversibel ist, erklären läßt, wird ausgelöst, wenn nach einer plastischen Verformung diese Legierungen durch Erwärmung über eine materialspezifische Temperatur wieder in ihre ursprüngliche Form zurückkehren, die sie vor der Verformung besaßen. Die Rückumwandlung erfolgt in einem Temperaturbereich, der sehr stark von der Legierungszusammensetzung abhängt und der sich durch Zugabe von Eisen, Kobalt, Mangan, Aluminium, Gold oder Zirkon verschiebt.

Das Wissen, daß durch geeignete Wahl der Legierungszusammensetzung von Memory-Legierungen thermisch gesteuerte Kräfte ausgelöst werden können, hat man sich auch schon bei einer Knochenplatte zunutze gemacht, die beidseitig der Knochenbruchstelle am Knochen angeschraubt und nach Erwärmung durch Kontraktion mittels Memory-Effekt eine Zugkraft auf die Knochenstücke beidseitig und in Richtung der Bruchstelle ausübt (US-PS 37 86 806). In der DE-OS 27 03 529 ist auch schon beschrieben worden, Implantate wie Marknägel, Osteosyntheseplatten und Prothesenteile und ähnliches aus Memory-Legierungen zu verwenden. Gleichermäßen ist auch vorgeschlagen worden, Knochennägel aus einem »Memory-Werkstoff« wie üblich in lange Bohrungen einzubringen und diese unter Ausnutzung des Memory-Effektes im Knochen aufzuweiten. Aber auch diese Marknägel zeigten eine unzureichende Verankerung.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen torsionssteifen Marknagel zu schaffen, der möglichst reibungslos in den Knochen einzubringen ist und der anschließend leicht und sicher im Knochen fixiert werden kann.

Die Aufgabe wird durch einen Marknagel mit den im Anspruch 1 beschriebenen Merkmalen gelöst, wobei der Marknagel aus einer Ni-Ti-Legierung mit 54 bis 56 Gew.-% Nickel, Rest Titan besteht.

Der besondere Vorteil des erfindungsgemäßen Marknagels liegt darin, daß er infolge seiner geschlossenen Form hohe Torsionssteifigkeit besitzt und kein Einwachsen von Knochensubstanz in einen Marknagelschlitz erlaubt und gleichermaßen die hohe Querelastizität des offenen Querschnitts besitzt. Diese Vorteile verbinden sich bei dem erfindungsgemäßen Marknagel mit der Möglichkeit, den Memory-Effekt optimal auszunutzen, so daß nach Auslösung des Memory-Effektes die Nagelaußenfläche an der Röhrenknocheninnenwand fest anliegt, wobei gleichzeitig eine gute Stabilisierung und gute Kompression gewährleistet sind. Gegenüber den bisher vorgeschlagenen Marknägeln aus einer Memory-Legierung ermöglicht die erfindungsgemäße Marknagelquerschnittsform mittels Auslösung des Memory-Effektes eine wesentlich größere Durchmesseränderung des Nagels, so daß der Ein- und Ausbau kräftefrei erfolgen kann.

Nach einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung besitzt der Marknagel einen doppelwandigen Aufbau, in dessen Hohlraum zwischen den Doppelwänden ggf. ein

Formteil eingeschoben ist. Damit kann eine weitere Erhöhung der Steifigkeit des Marknagels, insbesondere nachdem er in den Knochen eingebracht ist, erzielt werden. Ebenso gut lassen sich auch die durch Doppelwände geschaffenen Hohlräume dazu verwenden, um darin gasförmige und/oder flüssige Körper einzuleiten. Die Gase und/oder Flüssigkeiten können sowohl im Hinblick auf eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften des Marknagels als auch zur gezielten Auslösung des diesem Marknagel innewohnenden Memory-Effektes, nämlich durch geeignete Vorwärmung oder -kühlung, verwendet werden.

Um den Marknagel während des Einbringens in den Knochen gut führen zu können, weist die Marknagelspitze eine axiale, verschließbare Öffnung zur Aufnahme eines Führungskörpers auf. Dieser kann nach einer weiteren Ausbildung der Erfindung aus einem Spieß bestehen, der auf seiner Spitze einen aufgesteckten Kunststoffkonus trägt, mit dem beim Herausziehen des Führungskörpers die Öffnung im Marknagel verschließbar ist. Nach einer Weiterbildung des erfindungsgemäßen Marknagels besitzen dessen im Querschnitt konkaven Außenwände ein feines, unregelmäßiges Wellenprofil, das durch auf die Marknagelaußenwände aufgebraachte Blech- oder Drahrundteile gebildet wird.

Eine weitere Verbesserung der Marknagelstabilität wird erreicht, wenn dessen Kanten materialverstärkt sind.

Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in den Zeichnungen dargestellt. Es zeigen

Fig. 1 bis 3 je einen Marknagelquerschnitt im Zustand vor (jeweils Fig. a) und nach der Auslösung des Memory-Effektes (jeweils Fig. b)

Fig. 4a, b einen Marknagel mit fünfeckigem Querschnitt mit verstärkten Kanten,

Fig. 5 einen Marknagel im Querschnitt mit aufgeschweißten Rundstäben, vor (b) und nach der Auslösung des Memory-Effektes (a),

Fig. 6 einen vor Auslösung des Memory-Effektes viereckigen Marknagel mit aufgeschweißten Rundstäben, der nach Auslösung des Memory-Effektes Kreisform annimmt (b) und

Fig. 7 einen Längsschnitt durch einen Marknagel mit Führungskörper und aufgestecktem Kunststoffkonus und

Fig. 8 einen Marknagel im Längsschnitt, bei dem die Öffnung an der Marknagelspitze von innen mit Kunststoffkonus verschlossen wird.

Den dargestellten erfindungsgemäßen Marknägeln ist gemeinsam, daß sie einen geschlossenen Mantel aufweisen. Dies kann einerseits durch einen Hohlquerschnitt gewährleistet werden, wie z. B. einem quadratischen Rohr, oder in einer anderen zweckmäßigen Ausführung durch ein zur Kreisform gewickeltes Blech, bei dem mindestens auf einem Teil des Umfanges zwei oder gar mehr Blechlagen übereinanderliegen können. An den Enden des Nagels kann der Hohlraum abgeschlossen oder offen sein. Der Nachteil des geschlossenen Querschnitts besteht beim Einbau des Nagels in dem starken Widerstand gegen eine allseitige Zusammendrückung in radialer Richtung d. h., in einer geringen Querelastizität. Dieser Nachteil wird durch die Formgebung des Nagels, die Konstruktion der Nagelteile und durch die Wahl des Werkstoffes behoben. Die in Fig. 1 dargestellte Form des hohlen Marknagelquerschnitts zeigt, daß die Nagelwand 1 teilweise oder ganz aus konkaven Kreisbögen zusammengesetzt ist, so daß sich eine Art sternförmige Kontur mit einer Rotations-

symmetrie ergibt. Nach Drehung des Querschnittes um den Winkel  $2\pi/n$ , wobei  $n$  die Zahl der Kanten 9 des Marknagels ist, kommt diese Form wieder mit sich selbst zur Deckung. Die Wahl der kreiszylindrischen Wandteile mit dem Radius  $P_0$  in Fig. 1b hat den Vorteil, daß diese Teile bei der Verformung in radialer Richtung (Fig. 1a) mittels eines kreisbogenförmigen Stempels mit einem kleineren Radius  $P_1$  einer gleichmäßigen reinen Biegeverformung unterworfen werden, d. h., gleichmäßig beansprucht und ausgenutzt werden. Sie weisen dann an Innen- und Außenfaser überall die gleiche Randdehnung in Umfangsrichtung auf. Der erfindungsgemäße Nagel ist aus einer Metallegierung gefertigt, die zu 55% aus Ni und 45% Ti besteht, so daß der Marknagel durch Wärmezufuhr von der in Fig. 1a

dargestellten Form in die in Fig. 1b dargestellte Konfiguration überführt werden kann. Die sternförmige Querschnittsform gestattet es, auch mit einem geschlossenen Nagel eine besonders große Änderung des Durchmessers des einhüllenden Kreises 10 bzw. 10' hervorzurufen. Die erzielbaren Durchmesseränderungen lassen sich rechnerisch abschätzen, wenn eine bestimmte Symmetriezahl  $n$ , ein bestimmter Radius  $P_0$  und eine zulässige Dehnungsänderung der Randfasern des Bleches beim Übergang von der einen in die andere der dargestellten Konfigurationen und zurück vorgegeben wird. Bei der nachfolgend dargelegten Abschätzung wird die Blechdicke als vernachlässigbar klein angenommen. In diesem Falle gelten folgende Beziehungen

a) für die Durchmesseränderung  $D = 2r$

$$\frac{x}{r} = \frac{AD}{D} = 1 - \frac{\rho_0}{r} \arcsin \left[ \frac{r}{\rho_0} \sin \frac{\pi}{n} \right] + \frac{\rho_1}{r} \left[ \frac{\pi}{2} \left( 1 - \frac{2}{n} \right) - \frac{1}{\tan \frac{\pi}{n}} \right],$$

b) für die Strahlenlänge, bezogen auf den Radius  $r$

$$\frac{y}{r} = \frac{\rho_0}{r} \arcsin \left[ \frac{r}{\rho_0} \sin \frac{\pi}{n} \right] - \frac{\rho_1}{r} \cdot \frac{\pi}{2} \left( 1 - \frac{2}{n} \right).$$

Dabei ist  $r$  der Radius des Kreises um den Querschnitt der in Fig. 1b dargestellten Form,  $x = \frac{AD}{2}$  die Verringerung dieses Radius bei Übergang in die in Fig. 1a dargestellten Konfiguration.

Wenn die Blechdicke  $t$  vorgegeben ist, beträgt die Dehnungsänderung in den Randfasern der zylindrischen Teile im mittleren Bereich

$$|\Delta \varepsilon| = \frac{t}{2} \left( \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_0} \right).$$

Gibt man eine zulässige Dehnungsänderung, d. h. z. B. eine infolge des Memory-Effektes aktivierte Änderung vor, so läßt sich bei gegebenem  $\rho_0$  der Radius  $\rho_0$  und damit die in Fig. 1a dargestellte Form berechnen.

Als Grenzfall sei auch hier der Fall  $\rho_0 \rightarrow \infty$ , d. h. das Vieleck als die in Fig. 1b dargestellte Konfigu-

ration angeführt. Dabei ist

$$\frac{\rho_0}{r} \arcsin \left[ \frac{r}{\rho_0} \sin \frac{\pi}{n} \right]$$

durch

$$\sin \frac{\pi}{n}$$

zu ersetzen.

Als spezielles Ausführungsbeispiel werden hier die nachfolgend ersichtlichen Fälle dargelegt:

$$\begin{aligned} t &= 0,8 \text{ mm} & 1 \quad \rho_0 &= r \\ D &= 11 \text{ mm} & 2 \quad \rho_0 &\rightarrow \infty \text{ (Polygon)} \\ \Delta \varepsilon &= 0,1 = 10\% \end{aligned}$$

Symmetriezahl $n$	Fall 1, $\rho_0 = r$			Fall 2, $\rho_0 \rightarrow \infty$		
	$\rho_1/r$	$y/r$	$x/r$	$\rho_1/r$	$y/r$	$x/r$
3	0,42105	0,82674	negativ	0,72727	0,48523	0,09488
4	0,42105	0,45471	0,12424	0,72727	0,13591	0,13682
5	0,42105	0,23149	0,18899	0,72727	negativ	0,09665
6	0,42105	0,08268	0,18804	0,72727	negativ	0,00193
7	0,42105	negativ	0,14930	0,72727	negativ	negativ

Aus oben stehender Tabelle ergibt sich, daß gewisse Formen praktisch nicht realisierbar sind (bei jeweils negativen Werten für  $\frac{x}{r}$  bzw.  $y/r$ ) und daß andere besonders große Durchmesseränderungen liefern. Ins-

besondere ergibt sich für den Fall des in Fig. 1a und b dargestellten sternförmigen fünfkantigen Nagels bei  $P_0 =$  reine Durchmesseränderung von fast 19%.

Es sind jedoch auch andere Marknagelquerschnittsformen wie z. B. die in Fig. 1a dargestellte mäanderför-

mige Form, die nach Abschluß der Erwärmung in eine Kreisform 10' mit dem Radius  $r$  entsprechend Fig. 2b übergeht, möglich. Zwischen den in Fig. 2a und b dargestellten Formen bestehen ebenfalls große Durchmesseränderungen, wenn sie auch nicht die Wirkung der in Fig. 1 dargestellten Sternform mit konkaven Querschnittsseiten erreicht. Die in Fig. 2a dargestellte Mäanderform hat sechs Ausstülpungen, die jeweils einen Radius  $\rho_2$  aufweisen und deren Verbindungsstücke einheitlich den Radius  $\rho_1$  besitzen.

Ein weiterer erfindungsgemäßer Marknagel ist in Fig. 3 dargestellt. Die in Fig. 3b dargestellte Form, bei der die Außenwände des Marknagels konkave Teilstücke eines Kreisbogens mit dem Radius  $\rho_0$  sind, kann durch Ausnutzung des Memory-Effektes in die Fig. 3a dargestellte Form überführt werden. Bei diesem Übergang bilden sich an den Marknagelkanten blattförmige Spitzen aus, zwischen denen die Marknagelaußenwand jeweils einen Teilkreisbogen mit dem Radius  $\rho_1$  beschreibt. Der Memory-Nagel entsprechend Fig. 3 trägt dem Verformungsverhalten des Werkstoffes insbesondere dadurch besonders Rechnung, daß eine starke lokale Verformung längs der Kanten 9 durch Erhaltung des Winkels  $\alpha$ , der durch Verlängerung der spitz aufeinander zulaufenden Marknagelaußenwände gebildet wird, vermieden wird. Zur Stabilisierung des Marknagels ist nach Auslösung des Memory-Effektes ein Formteil 14 eingeschoben worden, das die Innenkontur des Marknagels gemäß Fig. 3b hat.

Die in Fig. 4a und 4b dargestellten Marknagelquerschnitte unterscheiden sich von den bisherigen Marknagelquerschnitten durch verstärkte Ecken bzw. Kanten 2. Hierbei ist es sowohl möglich, entsprechend Fig. 4a die Kanten so auszuprägen, daß sie verbreiterte Auflageflächen erhalten, wodurch die Flächenpressung zwischen

dem Knochen und dem Marknagel verringert wird, als auch an den Kanten des Marknagels größere Ausrundungsradien vorzusehen. Wie in Fig. 4b dargestellt, kann die Verstärkung der Kanten sowohl im Marknagelinnenraum als auch an der Außenkante aufgebracht werden. Im einfachsten Falle verwendet man aufgeschweißte Rohr- oder Drahtdrücke. Die in Fig. 4a und b dargestellte Ausführungsform besitzt dazu den Vorteil, die Biegesteifigkeit und Tragfähigkeit des Nagels durch Anordnung von Material an den am weitesten außen liegenden Teilen des Umfangs zu erhöhen und gleichzeitig seine Querelastizität beizubehalten. Dies ist auch dann möglich, wenn ein Marknagel entsprechend Fig. 4a geschaffen wird, bei dem das Blech im Kantenbereich stark gebördelt wird und hierdurch die größere Auflagefläche erzielt wird.

Eine weitere vorteilhafte Ausführungsform des Marknagels ist in Fig. 5 im Querschnitt dargestellt. Die in Fig. 5b skizzierte Querschnittsform mit aufgeschweißten Rundstäben 3 oder Verdickungen mit einem Hüllkreisradius  $r$  läßt sich durch Anwendung des Memory-Effektes in die in Fig. 5a dargestellte Form überführen, wobei die Rundstäbe 3 bzw. Verdickungen radial nach innen wandern, so daß sich ein Hüllkreisradius  $a$  ergibt. Dies ist dadurch möglich, daß die Marknagelwände an den Aufschweißlinien 12 der Rundstäbe 3 bzw. Verdickungen radial nach innen wandern, während die dazwischenliegenden Marknagelwandstücke 13 nach außen wandern, so daß sich die in Fig. 5a dargestellte Kissenform ergibt. Für die Abschätzung der in Fig. 5a und b dargestellten Formen und der damit verbundenen Durchmesseränderung des Marknagelhüllkreises gelten folgende geometrische Beziehungen:

$$\frac{x}{r} = \frac{AD}{D} = 1 - a/r.$$

Die Werte  $\frac{a}{r}$  und der Winkel  $\beta$  können aus den Gleichungen

$$\frac{a}{r} \left[ \cos \beta - \cos \left( \frac{\alpha}{2} + \beta \right) \right] + \frac{\rho_2}{r} \cos \left( \frac{\alpha}{2} + \beta \right) - \frac{\rho_1}{r} \cos \beta = \frac{\rho_1}{r} + \frac{\rho_2}{r}$$

und

$$\frac{a}{r} \left[ \sin \beta - \sin \left( \frac{\alpha}{2} + \beta \right) \right] + \frac{\rho_2}{r} \sin \left( \frac{\alpha}{2} + \beta \right) - \frac{\rho_1}{r} \sin \beta = \beta \left( \frac{\rho_1}{r} + \frac{\rho_2}{r} \right) + \frac{\alpha}{2} \left( \frac{\rho_2}{r} - \frac{\rho_1}{r} \right)$$

berechnet werden, wenn  $\rho_1/r$  und  $\rho_2/r$  bekannt sind. Diese Gleichungen sichern die Erhaltung der Bogenlänge des Marknagelrohres bei Übergang von der in Fig. 5b dargestellten Form zu der in Fig. 5a dargestellten Form. Aus der Berechnung der Randdehnungen auf der Wert  $\Delta \varepsilon$  bei diesem Übergang folgen die Bedingungen

$$|\Delta \varepsilon| \cong \frac{t}{2} \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{r_1} \right)$$

sowie entsprechend

$$|\Delta \varepsilon| \cong \frac{t}{2} \left( \frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{r_1} \right)$$

Dabei ist  $t$  die Blechdicke des Nagelrohres und  $\Delta \varepsilon$  wird als zulässiger Dehnungswert, z. B. als verfügbare

Dehnung aus dem Memory-Effekt vorgeschrieben. Mit der Abkürzung

$$\varepsilon^* = |\Delta \varepsilon| : \frac{2r}{t}$$

lassen sich daraus dann die Grenzwerte für die Radien  $r_1$ ,  $\rho_1$  und  $\rho_2$  errechnen. Es gilt

$$\frac{r_1}{r} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\rho_1}{r} \right)$$

und damit

$$\frac{\rho_1}{r} \cong \frac{1}{2} \left[ \frac{\varepsilon^* - 1}{\varepsilon^*} \pm \sqrt{1 - \frac{6}{\varepsilon^*} + \frac{1}{\varepsilon^{*2}}} \right]$$

und

$$\frac{\rho_2}{r} \geq \frac{1 - \rho_1/r}{2 + \varepsilon^* (1 - \rho_1/r)}$$

Dabei ist der physikalisch sinnvolle Wert für  $\rho_1/r$  aus den beiden Lösungen auszuwählen. Das Geradenstück  $y$  ist dann aus

$$\frac{y}{r} = \frac{r_1}{r} \cdot \frac{\alpha}{2} - \frac{\rho_2}{r} \left( \frac{\alpha}{2} + \beta \right) - \frac{\rho_1}{r} \beta$$

zu berechnen.

Eine sehr grobe Abschätzung des Minimalwertes für die Durchmesseränderung läßt sich sehr einfach ermitteln, wenn man von der Beschränkung der Dehnungen abgeht und  $\rho_2 = 0$ ,  $\beta = 0$  fordert.

Dann entartet das wellenförmige Profil der Form nach Fig. 5a in ein Polygon, und man kann angeben (mit  $\alpha = \pi/2n$ )

$$\frac{r_1}{r} = \frac{1}{1 + \frac{\pi}{n} \tan \frac{\pi}{2n}}$$

$$\frac{2\rho_1}{r} = \frac{\pi}{n} \cdot \frac{\tan \frac{\pi}{2n}}{1 + \frac{\pi}{n} \tan \frac{\pi}{2n}}$$

$$\frac{x}{r} = 1 - \frac{\pi}{n} \cdot \frac{1}{\sin \frac{\pi}{n}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\pi}{n} \tan \frac{\pi}{2n}}$$

Die Strecke  $y$  ist dann

$$\frac{y}{r} = \frac{\pi}{n} \cdot \frac{r_1}{r} = \frac{\pi}{n} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\pi}{n} \tan \frac{\pi}{2n}}$$

Man erhält als untere Schranken für die Durchmesseränderung folgende Zahlenwerte:

$n$	$\frac{\rho_1}{t}$	$\frac{x}{r} = \frac{\Delta D}{D}$
2	0,61102	0,38898
3	0,37679	0,24642
4	0,24547	0,16192
5	0,16954	0,11227
6	0,12304	0,08165

Hierbei ist lediglich die Bogenlänge der Rohrwand erhalten geblieben. Für  $n=4$  ist die entsprechende Form in Fig. 6a bzw. 6b dargestellt.

Die besonderen Vorteile der erfindungsgemäßen Nagelform liegen in der größeren Torsionssteifigkeit und der größeren Torsionstraglast des geschlossenen Querschnittes gegenüber dem offenen bei gleicher Wanddicke, in der Verhinderung des Einwachsens von Knochen in das Innere des Nagels durch den geschlossenen Querschnitt und damit einer leichten Entfernbarkeit sowie in der großen Durchmesserände-

rung dieses Hohl Nagels. Als besonders günstig erweist sich diese Form außerdem für die Sicherstellung der Rotationsstabilität der Fragmente. Es besteht außerdem die Möglichkeit, durch Aufgabe eines pneumatischen oder hydraulischen Innendruckes den Nagel zusätzlich aufzuweiten. Auch durch Einführung eines Formteils in den Nagel kann sowohl eine zusätzliche Aufweitung als auch eine zusätzliche Vergrößerung der Tragfähigkeit und der Steifigkeit erreicht werden.

Es besteht ferner die Möglichkeit, den Nagel sehr dünnwandig auszuführen, wodurch eine noch größere Durchmesseränderung erreichbar wird, und ihn dann anschließend durch einen einfühbaren Innennagel zu verstärken. Der besondere Vorteil besteht darin, daß bei Erwärmung des Nagels mittels heißer Flüssigkeit oder heißen Gases der Nagel ohne Kontamination des umgebenden Gewebes direkt und mit gutem Wärmeübergang innen durchgespült werden kann. Hierfür kann an einem Ende ein spezieller Anschluß z. B. in Form einer Gewindebohrung vorgesehen werden.

Wie in Fig. 7 dargestellt, erfolgt die Einbringung des Marknagels vorteilhafterweise über einen als Führungskörper 4 dienenden Führungsspieß, über den der jeweils zu den in Fig. 1b, 2b, 3b oder 5b dargestellten Form vorverformte Marknagel geschoben wird. Der Führungsspieß trägt auf seiner Spitze einen aufgesteckten Kunststoffkonus 5, der beim Herausziehen des Führungskörpers 4 automatisch die Öffnung an der Marknagelspitze verschließt und in eine Sicherungsnut einrastet. Entsprechend der in Fig. 8 dargestellten Anordnung ist es aber auch möglich, das Führungsloch an der Marknagelspitze 7 über einen Kunststoffkonus 8 von innen zu verschließen.

Der Marknagel wird nach dem Prüfen des richtigen Sitzes ggf. unter einem Bildwandler direkt mit heißer Flüssigkeit oder mittels einer Kontaktheizsonde oder möglicherweise auch induktiv erwärmt und nimmt dann seine aufgeweitete Konfiguration entsprechend Fig. 1b, 2b, 3b, 5b wieder nahezu an, so daß er sich im vorbereiteten Markkanal festklemmt und die Fraktur stabilisiert. Das hintere Ende des Marknagels kann dann ebenfalls mittels eines Kunststoffkonus verschlossen werden, aber auch offen bleiben.

Für das Entfernen des Marknagels ist besonders vorteilhaft, daß der Marknagel, falls er aus einer Memorylegierung gefertigt ist, durch Abkühlung seinen Hülldurchmesser wieder verringert, so daß die Klemmwirkung gelöst wird und der Marknagel leicht entfernt werden kann.

Es ist aber auch möglich, den Marknagel nur teilweise auf seiner Länge zu erwärmen, so daß der Memory-Effekt nur an ganz bestimmten Stellen ausgenutzt wird. Dies kann insbesondere dann ausgenutzt werden, wenn etwa eine Kompression in Längsrichtung gewünscht wird. Hierbei ist der Marknagel zusätzlich durch Recken in Längsrichtung vorgeformt und kann an seinen Enden beispielsweise ausfahrbare oder aufgesetzte Verankerungsteile aufweisen. Die Verankerung an den Enden wird nach Einbringung zunächst ausgelöst und erst anschließend durch Erwärmung im mittleren Bereich die Längskompression erzeugt. Ähnliche Vorteile können auch mit Marknägeln erreicht werden, die in einem der Zustände eine überlappende Anordnung der Marknagelwände aufweisen.

FIG. 1a

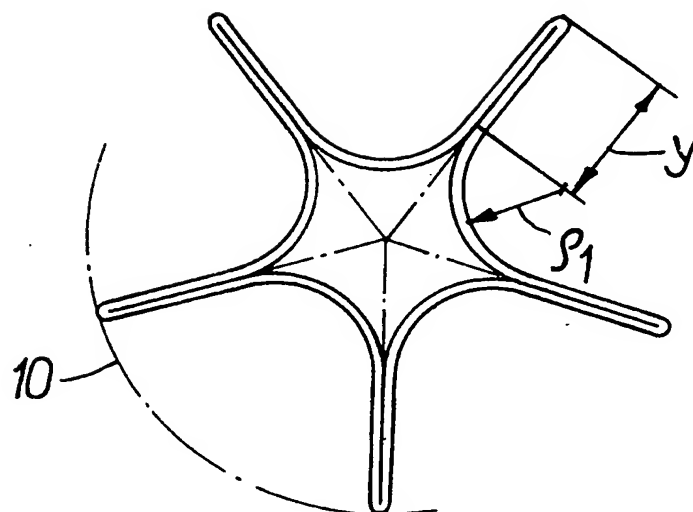


FIG. 1b

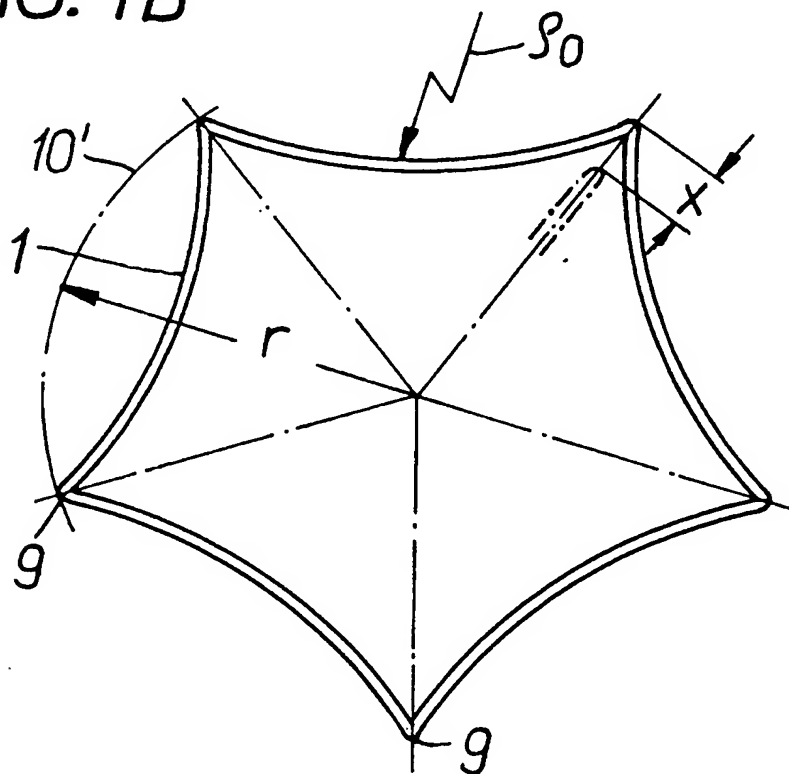


FIG. 2a

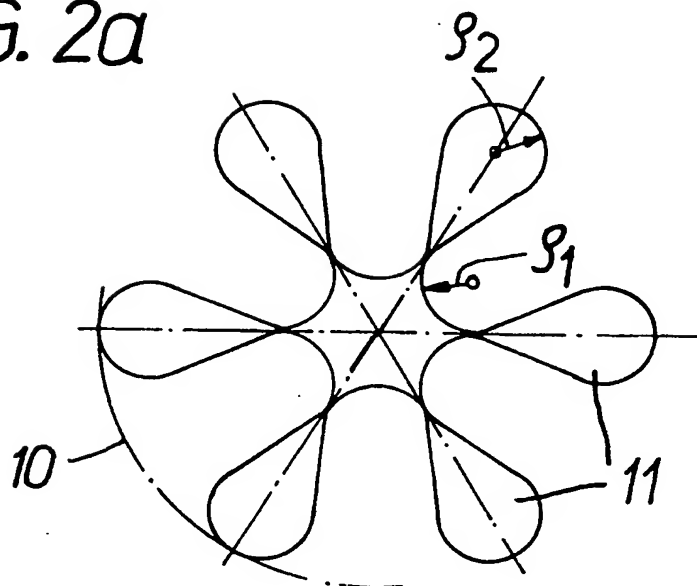


FIG. 2b

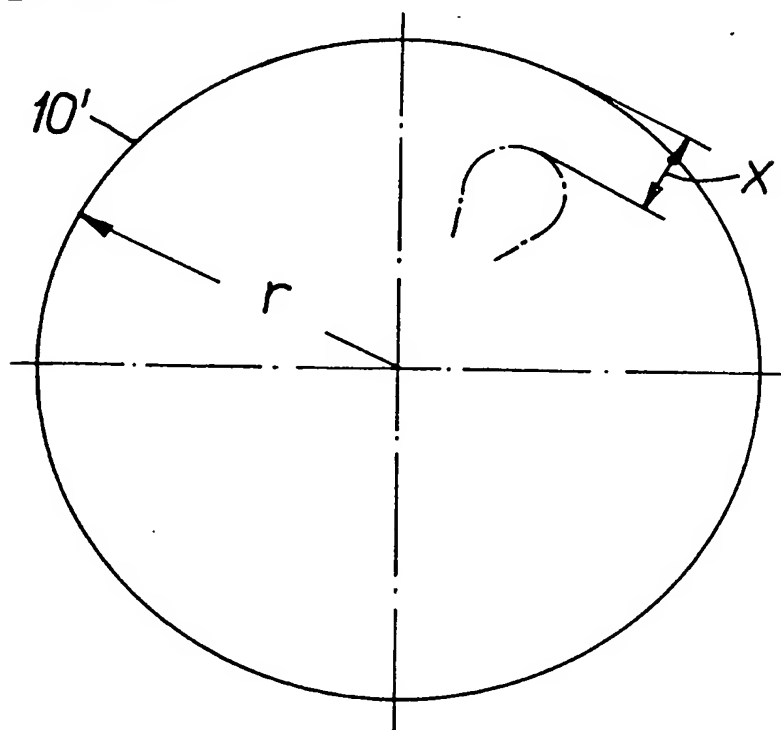




FIG. 3a

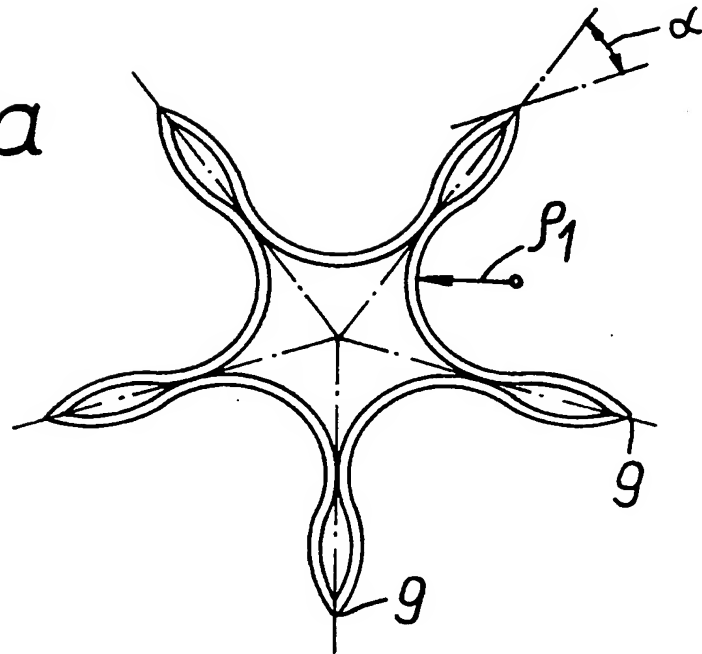


FIG. 3b

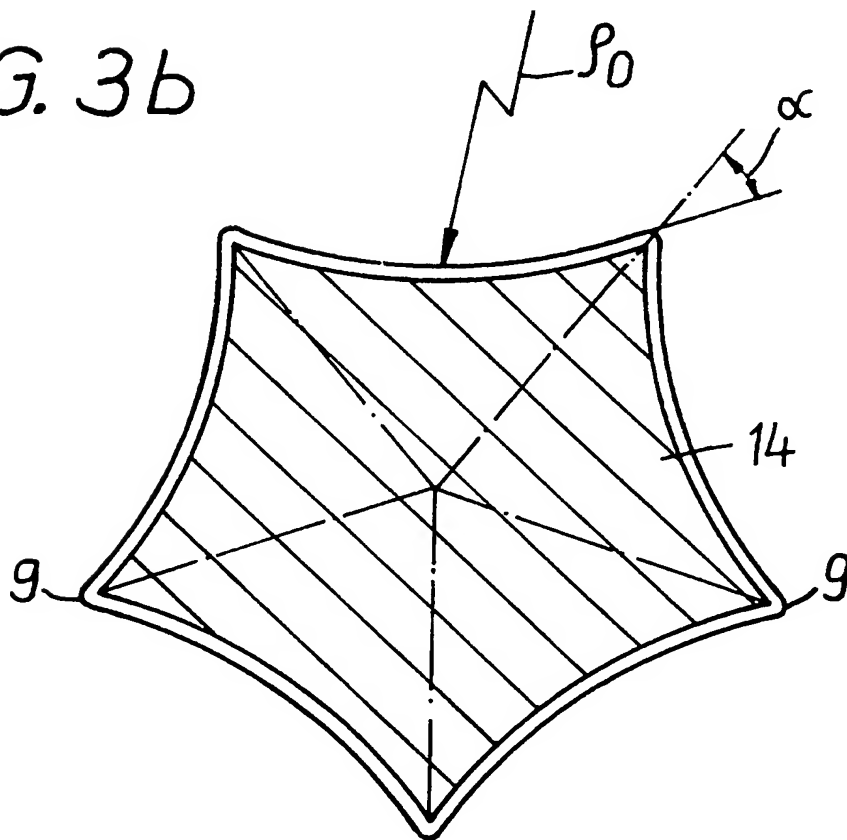


FIG. 4a

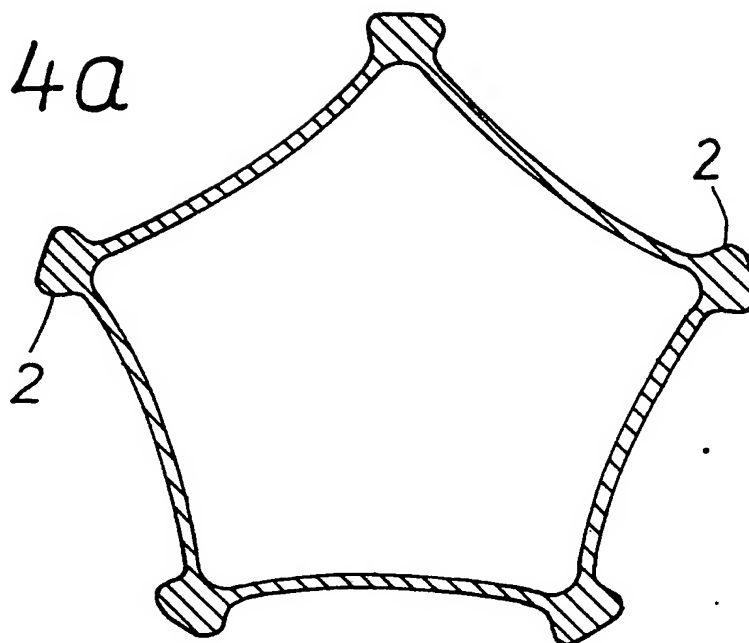


FIG. 4b

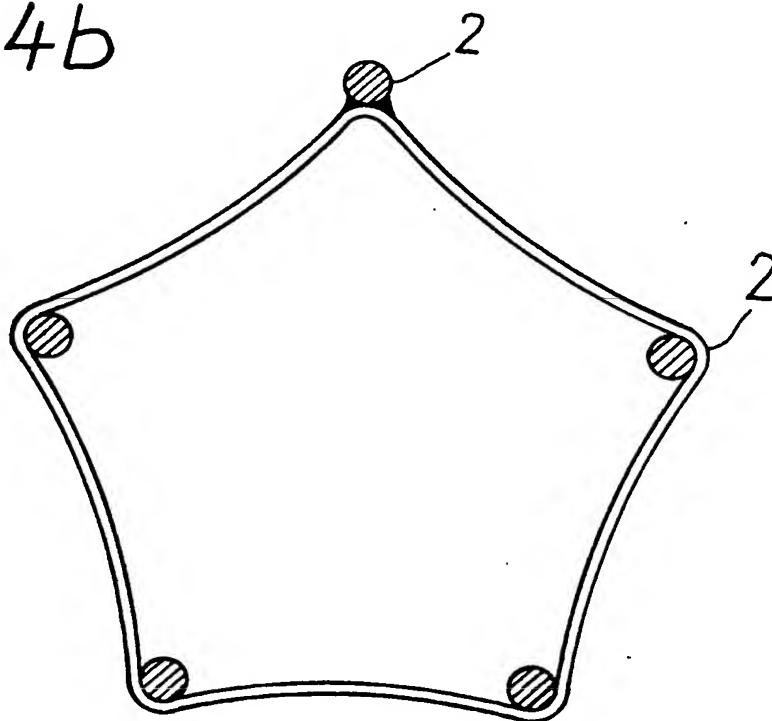


FIG. 5a

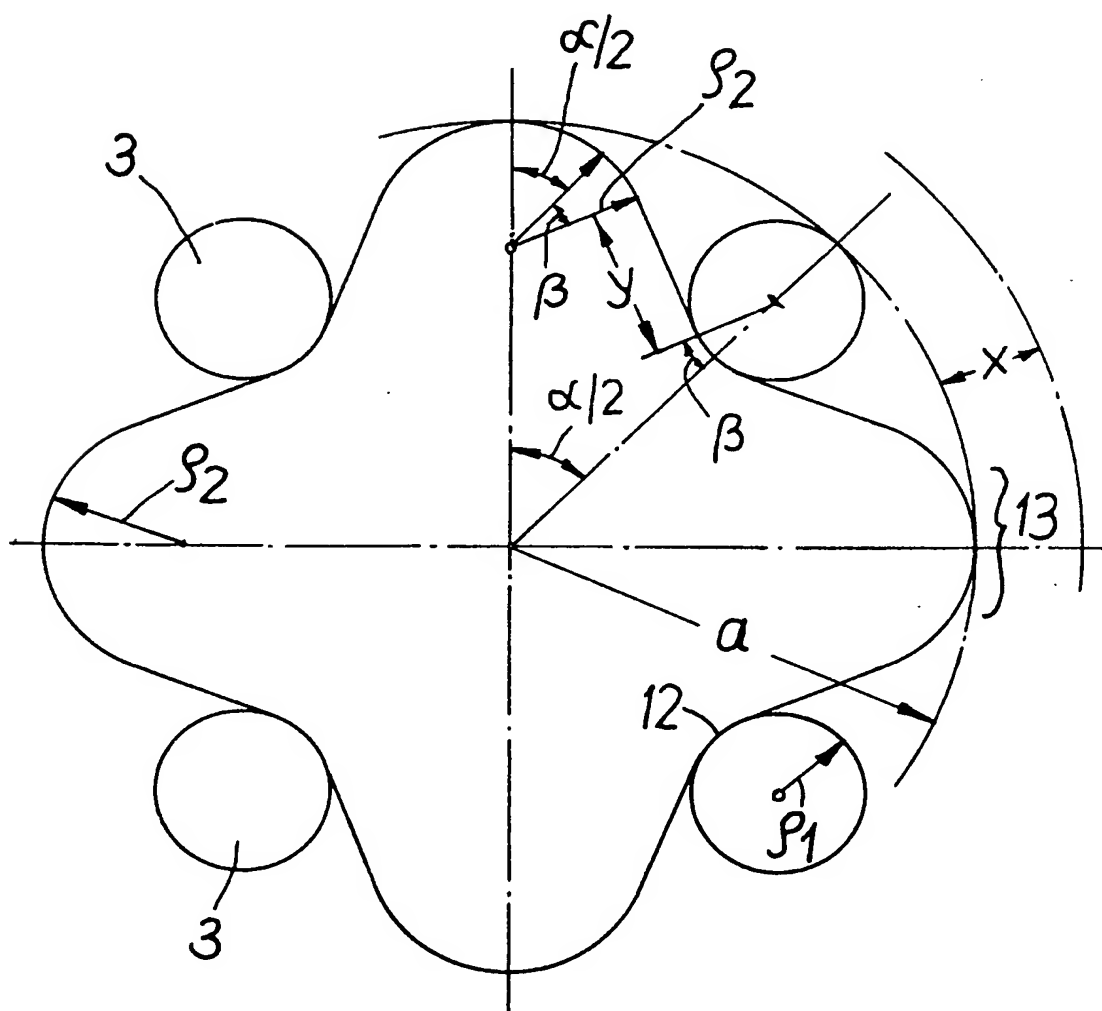


FIG. 5b

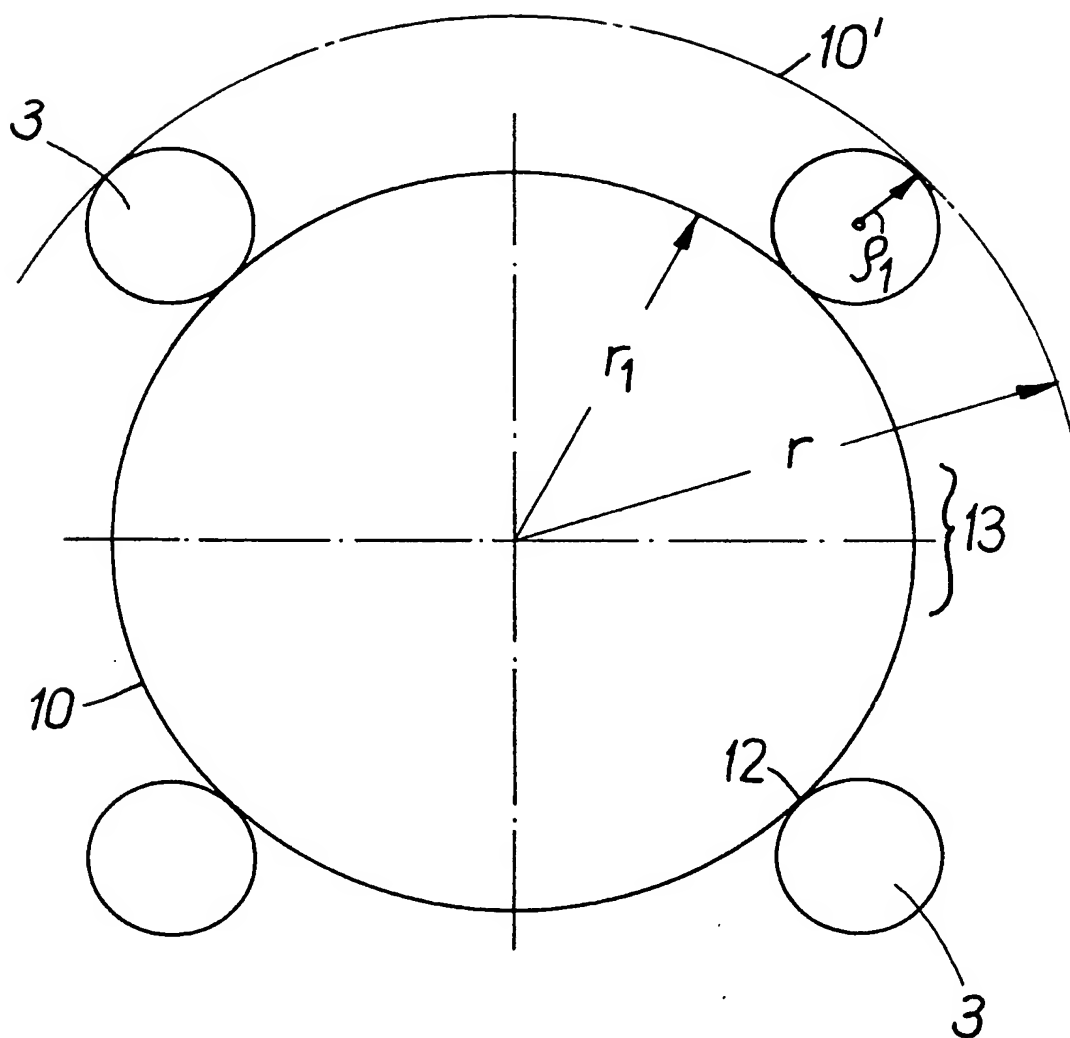


FIG. 6a

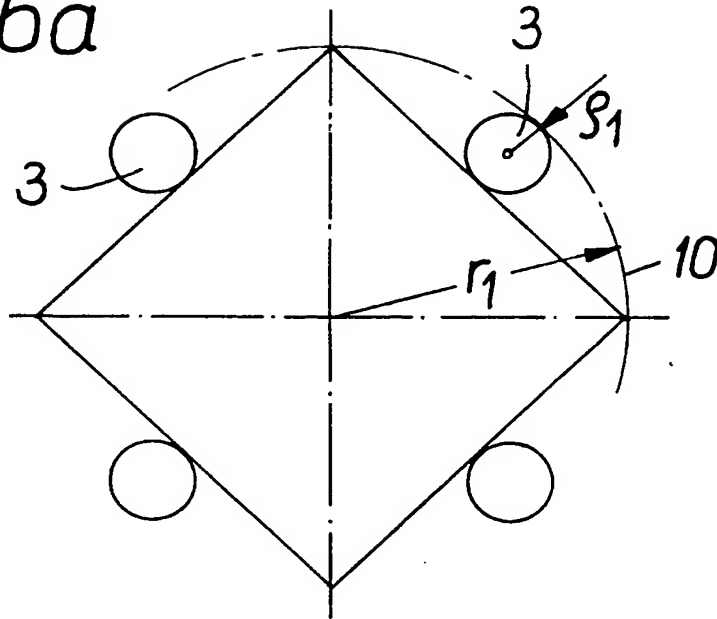


FIG. 6b

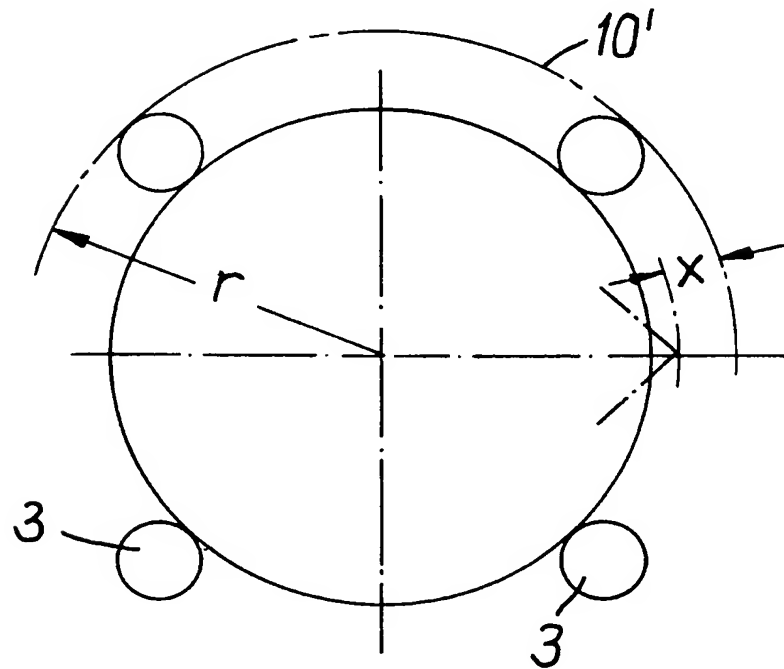


FIG. 7

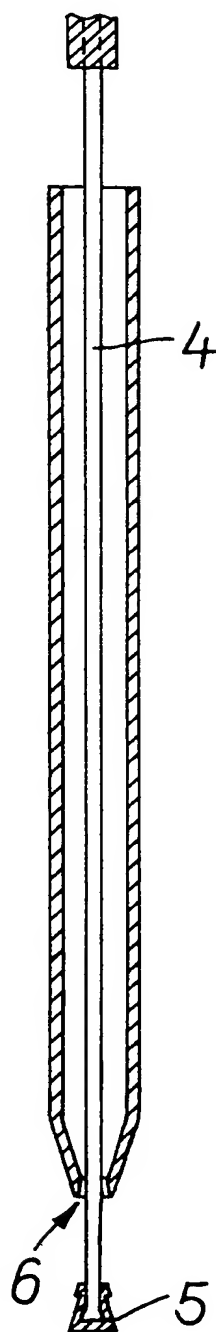


FIG. 8

